

文章编号: 0253-2239(2010)10-2952-06

多光束激光相干合成控制模型建立及效果分析

杨雨川^{1,2} 景峰¹ 李富全¹ 王逍¹ 黄小军¹ 冯斌¹ 罗晖^{2*}

(¹ 中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900; ² 国防科学技术大学光电工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要 利用阵列反射镜面的三维调整(绕 y/x 轴旋转和沿 z 轴平动)可实现多路光束间的相位差校正和焦斑定位。基于此建立了 2×2 光束相干合成控制模型, 并采用光学追迹和衍射计算求解模型, 计算得到旋转 $\pm 0.5 \mu\text{rad}$, 平动 $\pm 105.3 \text{ nm}$ 的调整精度。在精度范围内进行蒙特卡罗误差分析, 比较了平面波和非平面波入射条件下的系统性能, 并对对称结构光束布局进行了统计分析。结果表明, 对称结构可有效提高远场焦斑直径 $20 \mu\text{m}$ 环围功率比的统计平均水平。对大型高功率固体激光装置实现相干合成提高输出功率水平具有重要意义。

关键词 相干光学; 高功率固体激光装置; 旋转-平动参数; 蒙特-卡罗误差分析

中图分类号 O438.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20103010.2952

Building and Effect Evaluation of Multi-Beam Coherent Combining Control Model

Yang Yuchuan^{1,2} Jing Feng¹ Li Fuquan¹ Wang Xiao¹ Huang Xiaojun¹
Feng Bin¹ Luo Hui²

¹ Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China
² College of Optic-Electric Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China

Abstract A coherent beam combining model with 2×2 segment mirrors is developed with a 3D adjustment including 2D rotation and 1D translations to realize phase lock between individual beams for the higher output power. The combining model is simulated using ray tracing and diffraction method, and the accuracy of adjusting parameters with rotations of $\pm 0.5 \mu\text{rad}$ and translation of $\pm 105.3 \text{ nm}$ are obtained. Considering the adjusting tolerance, the system performance is estimated by Monte-Carlo error analysis for flat wavefront and non-flat wavefront. The power ratio within $20 \mu\text{m}$ diameter spot in symmetrical layout is statistically analyzed compared with that in asymmetrical layout. The results show that the symmetrical layout is effectively beneficial to raise output power level of large-scale high-power solid-state laser by coherent combining.

Key words coherent optics; high-power solid-state lasers; tilt/tip-piston parameters; Monte-Carlo tolerance analysis

1 引言

将多路激光光束进行相干合成是获得高功率, 高光束质量激光的有效途径^[1,2]。相干合成要求每个单元光束的波长、偏振方向保持一致^[1]。目前, 相干合束的应用方式有很多, 主要都是针对光纤激光器^[2~5]而进行的, 包括利用主振荡功率放大

(MOPA)技术实现相干合束、外腔相干合束技术、多芯光纤合束技术和利用受激布里渊散射(SBS)技术实现相干合束等。不同于光纤相干合束技术, 大型高功率固体激光装置, 例如日本和法国正在建造的点火激光器 LFEX^[6]和 PETAL^[7], 由于环境气体密度改变、振动等因素导致装置中反射元件快速振

收稿日期: 2009-11-23; 收到修改稿日期: 2010-01-17

基金项目: 国家 863 计划(2009AA8044005), 激光聚变实验室和激光研究中心创新基金资助课题。

作者简介: 杨雨川(1983—), 男, 博士研究生, 主要从事固体激光器相干组束方面的研究。E-mail: yyc_online@126.com

导师简介: 景峰(1969—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事固体激光技术方面的研究。E-mail: jingfeng@163.com

* 通信联系人。E-mail: luohui.luo@163.com

动,不仅引入聚焦光斑定位误差,而且使得束间相对光程差发生显著变化,为实现相干合成 LFEX(2×2 光路布局)和 PETAL(1×4 光路布局)均拟采用主动控制方式调整大尺寸阵列反射镜进行束间相位锁定和焦斑定位。本文从实现相干合成的基本条件出发,提出 2×2 光束相干合成的控制方法和物理模型,并采用几何光学追迹和衍射理论混合计算的方法对控制模型进行性能评估,得到绕 y/x 轴旋转和沿 z 轴平动 ($y_{\text{tilt}}/x_{\text{tip}} - z_{\text{piston}}$) 三维调整机构需要满足的控制精度,针对国内类似大型高功率固体激光装置实现相干合成进行优化,对于该类装置改善输出光束质量,提高功率水平具有重要意义。

2 物理模型建立和计算

2.1 模型建立

一种 MOPA 构型的高功率固体激光装置的组

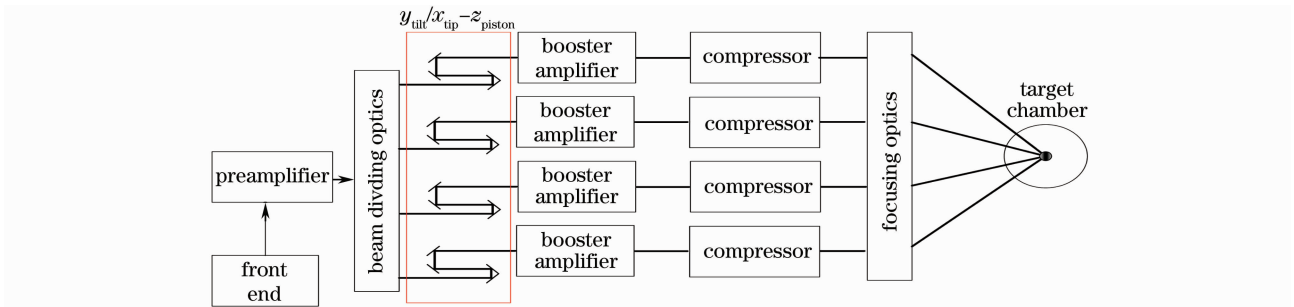


图 1 大型高功率固体激光装置示意图

Fig. 1 Schematic of large-scale high-power solid-state laser system

根据图 1 的装置示意图,建立束间相干合成物理模型如图 2 所示。其中,相位补偿分为束内和束间相位补偿:单路光束内的波前通过变形镜校正不在本文的讨论范围内,而束间光程变化和光束方向漂移则累计到四路独立的入射光中作为模型误差源

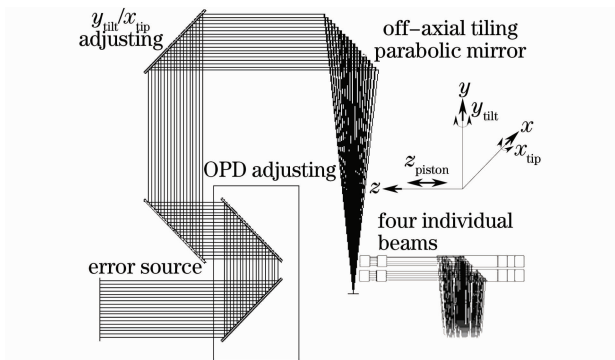


图 2 $y_{\text{tilt}}/x_{\text{tip}} - z_{\text{piston}}$ 调节机构实现四路光束相干合成模型

Fig. 2 Four individual beams coherent combination model with $y_{\text{tilt}}/x_{\text{tip}} - z_{\text{piston}}$ adjuster

成框图如图 1 所示,前端包括钕玻璃锁模振荡器,脉冲展宽器和一个光学参量啁啾脉冲放大器,经过预放大器,激光束分束为四路并且分别注入主放大器,放大后的激光脉冲通过压缩器进行脉宽压缩,最后四路子光束相干合成为一路光经离轴抛物面镜实现单焦斑聚焦。光束相干合成包括时间相干性和空间相干性:利用等幅光振动频谱分析 1~10 ps 的短脉冲,当输出激光谱线为宽度 1 nm,相干长度 $L_c = \lambda_0^2/\Delta\lambda > 1$ mm,毫米量级的相干长度在控制上易于实现,因此实现相干合成主要是实现光束的空间相干,束内光束均匀相位通过变形镜控制,因此涉及的空间相干性为束间相位相干性。该装置输出线偏振光且偏振方向可控。工作波长为 1.053 μm ,近红外波段线宽大于 10 nm 为宽带光束,线宽小于 10 nm 为窄带光束。装置输出光束谱线宽在 1 nm 水平,满足窄带光束相干合成的条件。

采用 $y_{\text{tilt}}/x_{\text{tip}} - z_{\text{piston}}$ 校正机构对束间光程差(OPD)和入射准直角对系统光路总相位起伏和角度漂移进行补偿,当光束准直入射且束间相位差等于波长的整数倍,得到施特雷尔比(SR)为 1 的远场焦斑。

2.2 计算方法

考虑一个存在波前误差的复杂光学系统, Σ_1 和 Σ_2 分别为系统的入瞳面和出瞳面。光学系统内部的波前误差,可等效为在系统出瞳面上的附加相位因子

$$p(x, y) = \exp[ik w_{e1}(x, y)], \quad (1)$$

式中 $k = 2\pi/\lambda$, $w_{e1}(x, y)$ 为系统的波前误差,(1)式的有效区域为出瞳内。

设入瞳面 Σ_1 上的复振幅为

$$U_1(x, y) = u(x, y) \cdot \exp[ik w_1(x, y)], \quad (2)$$

式中 $u(x, y)$ 为振幅空间分布情况。根据光学系统入瞳面与出瞳面的像传递关系,则出瞳面上的复振幅分布为

$$U(x, y) = U_1(x, y) \cdot p(x, y) =$$

$$u(x, y) \cdot \exp[ik\omega_1(x, y) + ik\omega_{e1}(x, y)]. \quad (3)$$

出瞳面波前复振幅包含了入瞳面波前的幅度, 光学系统透过幅度和相位累加光程差。由于出瞳面的复振幅已经包含了光学系统的所有波前误差, 因此该波前将无误差的传播到焦面成像。而重要的衍射效应则发生在出瞳面到像面之间, 也称为单步近似^[8]。在单步近似中, 采用衍射的方法来计算复振

幅波前传播到焦面附近区域, 出瞳位置到像面区域基于衍射波理论可计算焦面附近的衍射图样。因此该光学模型的求解可分为两个部分, 首先通过几何光学追迹法得到出瞳面复振幅波前分布, 然后在出瞳到像面附近区域通过球面衍射波理论求解, 得到焦面衍射图样。近轴范围内抽样点复振幅可写为

$$U(x, y) = \iint_{\Sigma_1} U_{\text{beam1}} h(x - \xi, y - \eta) d\xi d\eta + \iint_{\Sigma_2} U_{\text{beam2}} h(x - \xi, y - \eta) d\xi d\eta + \iint_{\Sigma_3} U_{\text{beam3}} h(x - \xi, y - \eta) d\xi d\eta + \iint_{\Sigma_4} U_{\text{beam4}} h(x - \xi, y - \eta) d\xi d\eta, \quad (4)$$

式中 $U_{\text{beam}l}$ ($l=1, 2, 3, 4$) 为对应四路光束出瞳位置的复振幅, $h(x - \xi, y - \eta)$ 在球面波衍射理论^[9]下的表达式为

$$h(x - \xi, y - \eta) = \frac{1}{i\lambda} \frac{\exp\left[i \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2 + z^2}\right]}{\sqrt{(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2 + z^2}}. \quad (5)$$

3 调整参数讨论

装置光束口径为 290 mm × 290 mm, 沿 x 和 y 方向的孔径间隔分别为 230 mm 和 70 mm, 离轴抛物面镜实现光线 90° 偏转聚焦。每路光束截面的光强在通光孔径内并非均匀分布, 而是进行了边沿软化, 选用超高斯方形光束来描述传播光束的截面空间分布 $u(x, y) = \exp\{-[(x/R_0)^{2n} + (y/R_0)^{2n}]\}$ 。图 3 给出了通光孔径光束振幅的归一化分布。实际情况中, 四路光束角度和轴向光程均受到外界因素如温度, 振动等影响, 以上干扰因素均影响焦斑形态和位置。为了有效分析所需要的调节器控制精度, 文中按照美国 OMEGAEP 激光装置中

拼接光栅的设计方法^[9]。先考虑其中一路光束角度和轴向光程对焦斑的影响, 在此条件下将得到相应控制精度并应用到四路调整机构中进行蒙特-卡罗误差分析, 得到所施加精度条件下的系统性能从而判断所取精度是否满足控制要求。调整参数包括四组二维角度 $y_{\text{tilt}}/x_{\text{tip}}$ 和一维光程 z_{piston} 如图 2 所示。对某一路参数进行依次调整, 远场光斑的 SR 和环围功率比(定义为直径 20 μm 的环围内所包含的功率占总发射功率的分数, PR)的变化曲线如图 4 所示, 图 4(a) 和 (b) 中, 虚线位置表示 0.5 μrad, 当绕 x

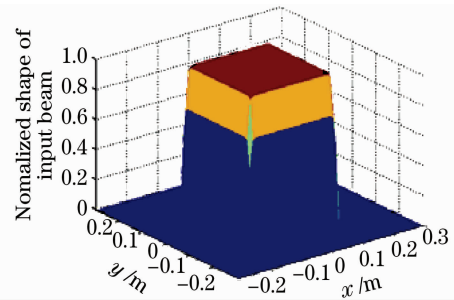


图 3 通光孔径振幅的归一化分布示意图

Fig. 3 Normalized amplitude distribution of aperture

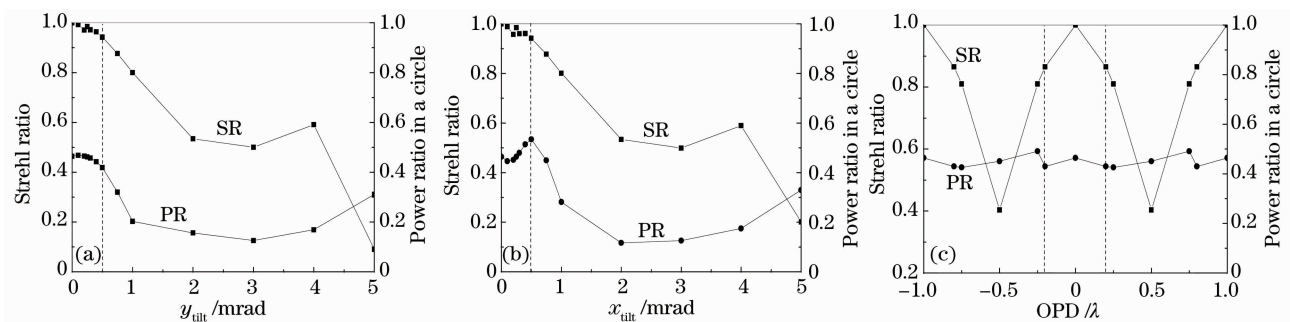


图 4 远场焦斑 SR 和 PR 随其中一路 $y_{\text{tilt}}/x_{\text{tip}} - z_{\text{piston}}$ 变化曲线

Fig. 4 SR and PR of far-field focal spot varying with $y_{\text{tilt}}/x_{\text{tip}} - z_{\text{piston}}$ in a single beam

和 y 轴的转动量小于 $0.5 \mu\text{rad}$, SR 和 PR 均处于较高水平分别大于 0.94 和 0.42, 图 4(c) 中径向移动范围在 210.6 nm (0.2λ) 内, 该区间内 SR 和 PR 具有相同变化趋势, 便于对系统性能进行评价。因此, 确定系统的调整精度须满足: $y_{\text{tilt}}/x_{\text{tip}}$ 精度 $\pm 0.5 \mu\text{rad}$, z_{piston} 精度 $\pm 105.3 \text{ nm}$, 考虑到环境振动和压电驱动器^[10] 的频率响应和驱动能力的影响, 可满足 $\pm 0.2 \mu\text{rad}$ 和 $\pm 50 \text{ nm}$ 的调整精度, 因此本文提出的相干组束模型参数调整精度较为合理。

4 系统性能的蒙特卡罗容限分析

第 3 节计算了某一路光束调整参数变化对 SR 和 PR 的影响, 同时分别得到三个参数的调整精度, 将该精度值应用到整个 $y_{\text{tilt}}/x_{\text{tip}} - z_{\text{piston}}$ 调节器 (共 12 个参数) 对系统性能进行评估。采用蒙特卡罗方法对 12 个独立参量进行误差容限分析: 每次蒙特卡罗循环, 在设定参数精度范围和干扰统计模型内随机产生特定的误差值, 所有误差参数服从正态统计分布, 统计次数均为 100 次。蒙特卡罗误差分析估计了符合误差设定条件下真实的系统性能, 统计结果对于工程任务是非常有用的, 但是因为采样率不够不一定严格遵循统计结果, 然而蒙特卡罗误差分

析却揭示了误差范围内所预测系统性能的概率, 对于光学系统而言仍是非常重要的分析方法。

入射光束为平面波, SR 和 PR 的统计分布如图 5 所示; 考虑现有变形镜的校正能力: 工作频率 30 Hz, 校正畸变幅度 $20 \mu\text{m}$, 精确度 $0.1 \mu\text{m}$ ^[11], 经过变形镜校正后的畸变波前参数选取为: 波前峰-谷值约为 $0.2 \mu\text{m}$, 标准偏差约为 $0.04 \mu\text{m}$, 出瞳位置波前和远场焦斑如图 6(a) 和 (b) 所示, 当入射光为该畸变波前, SR 和 PR 的统计分布如图 7 所示。

图 5 的统计结果显示, 在精度 $y_{\text{tilt}} = x_{\text{tip}} = \pm 0.5 \mu\text{rad}$, $z_{\text{piston}} = \pm 105.3 \text{ nm}$ 条件下, SR 超过 80% 的统计次数落在 $0.75 \sim 0.9$ 之间, PR 超过 80% 的统计次数落在 $0.35 \sim 0.45$ 之间, 图 7 的统计结果显示, SR 超过 80% 的统计次数下限大于 0.6, PR 超过 80% 的统计次数下限略小于 0.35, 表明束内波前畸变主要影响 SR 对 PR 的影响较小。表 1 比较了两种入射波前的远场焦斑恶化情况, 平面波入射, SR 和 PR 分别从 1 下降为 0.82, 从 0.464 下降为 0.404; 非平面波入射, SR 和 PR 分别从 0.777 下降为 0.672, 从 0.402 下降为 0.377, 同样精度水平, 平面波入射由于调整误差引起的焦斑恶化程度远大于非平面波入射的情况。

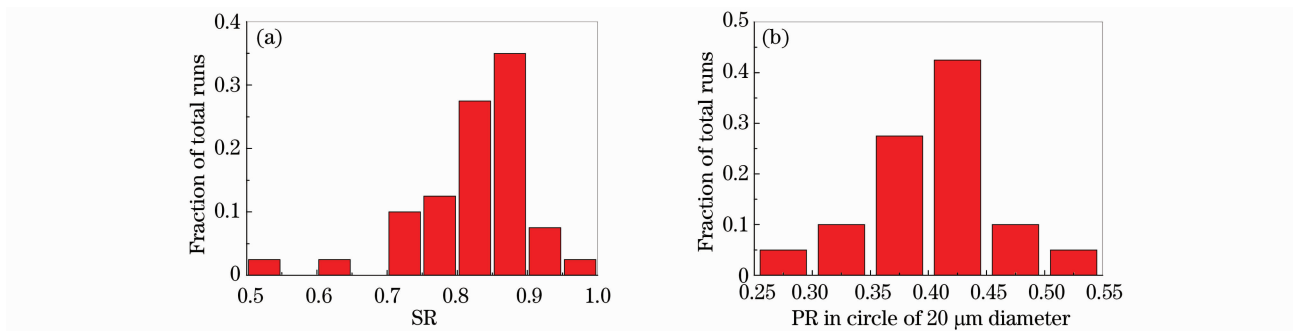


图 5 平面波入射条件下, SR(a) 和 PR(b) 的统计分布

Fig. 5 Histograms of SR (a) and RP (b) for a flat input wavefront

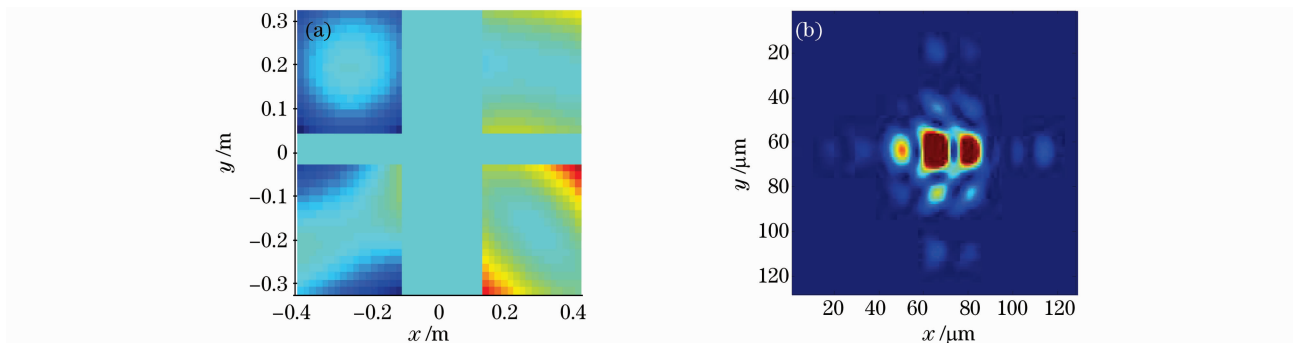


图 6 出瞳位置光程差分布(a)及其对应的远场光强图案(b)

Fig. 6 OPD at the exit pupil surface (a) and corresponding far-field intensity patterns (b)

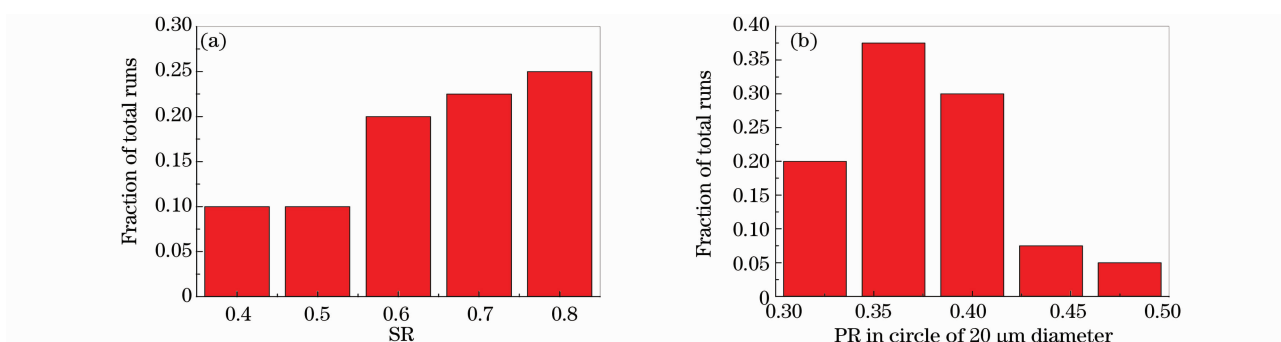


图 7 非平面波入射条件下,SR(a)和PR(b)的统计分布

Fig. 7 Histograms of SR (a) and PR (b) for a non-flat input wavefront

表 1 平面波和畸变波入射情况下,焦斑质量的统计结果

Table 1 Comparison of the focal-spot quality for the cases of a flat and a non-flat input wavefronts

	Perfect		Tolerance analysis for adjusting accuracy: $z_{\text{piston}} = \pm 105.3 \text{ nm}, y_{\text{tilt}} = x_{\text{tip}} = \pm 0.5 \mu\text{rad}$						
	SR	PR	Mean of SR	Min. To Max. of SR	Std of SR	Mean of PR	Min. To Max. of PR	Stdev of PR	
Flat wavefront	1	0.464	0.82	0.527~0.979	0.082	0.404	0.258~0.518	0.052	
Non-flat wavefront	0.777	0.402	0.672	0.385~0.894	0.142	0.377	0.310~0.463	0.040	

5 系统性能改进

现行装置光束口径布局占用的有效通光口径较少,因此能量集中度(环围功率比)的水平较低,表 2 给出了沿 x 和 y 方向不同孔径间距的 PR,由此可见,对称结构是一种比较好的光束布局方式,现有基础上仅改变 x 方向的孔径间距为 70,则可大幅度提高能量集中度。

表 2 不同孔径布局的 PR

Table 2 PR in of different aperture layouts

Aperture gap along $x, y / \text{mm}$	PR in 20 μm diameter / %
(230, 230)	33.59
(230, 70)	46.40
(70, 230)	46.35
(70, 70)	61.67
(10, 10)	79.72

同样考虑图 6 的波前分布,在该波前畸变情况下的远场干涉图案如图 8 所示,对比图 6(b),图 8 的旁瓣能量减少中心主峰能量集中度显著增加,调整精度不变进行蒙特卡罗误差分析,得到统计结果分别如图 9 和表 3 所示,根据对称布局的统计结果,SR 和 PR 平均值高于非对称情况,且统计分布发生了扩展,上限值大于非对称情况,下限值小于非对称情况。综上考虑,采用对称结构有利于提高远场焦斑质量的统计平均水平。

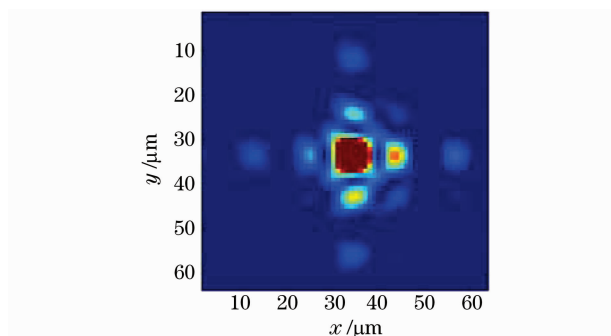


图 8 图 6(a)入射波前的远场光强图案

Fig. 8 Far-field intensity patterns considering wave front in Fig. 6(a)

6 结 论

单路激光输出谱线远小于 10 nm、偏振方向可控,具有实现相干合束的有利条件,利用相干合成可有效提高装置的输出功率水平。在此基础上,建立了对应的 2×2 束间组束控制模型并进行了模拟计算,得到三维调整机构的控制精度 $y_{\text{tilt}} = x_{\text{tip}} = \pm 0.5 \mu\text{rad}, z_{\text{piston}} = \pm 105.3 \text{ nm}$,并依据调整精度,在平面波和非平面波两种情况下,对 12 个调整参数采用蒙特卡罗误差分析预测该组束系统性能的概率。为了进一步提高合束激光输出能量集中度,考虑光束布局的影响,在原有系统基础上将 x 方向间距调整为 70mm 实现光束对称分布,系统施特雷尔

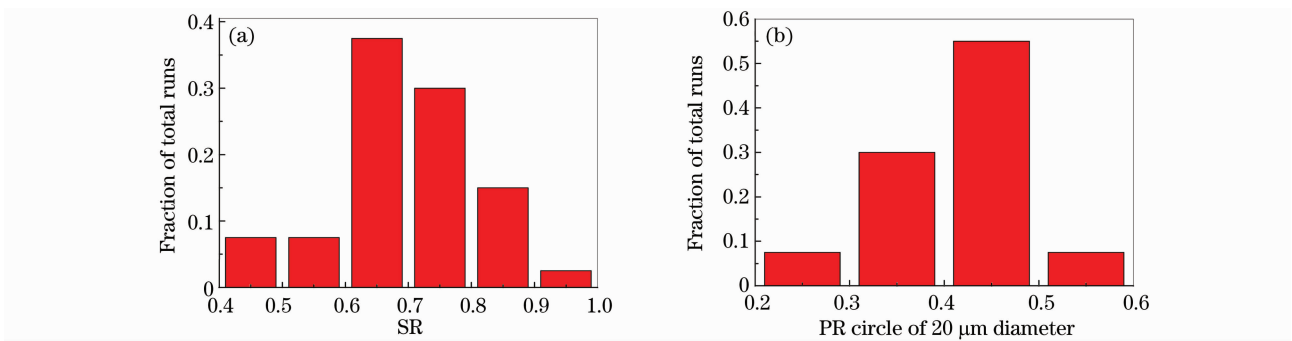


图 9 图 6(a)入射波前,SR(a)和 PR(b)的统计分布(对称布局)

Fig. 9 Histograms of SR (a) and PR (b) for a non-flat input wavefront in Fig. 6(a) in symmetrical layout

表 3 图 6(a)入射波前,焦斑质量的统计结果

Table 3 Statistical results of focal-spot quality for the case of non-flat input wavefront in Fig. 6(a)

	Perfect		Tolerance analysis for adjusting accuracy: $z_{\text{piston}} = \pm 105.3 \text{ nm}, y_{\text{tilt}} = x_{\text{tip}} = \pm 0.5 \text{ } \mu\text{rad}$							
	SR	PR	Mean of SR	Min. of SR	To Max. of SR	Std of SR	Mean of PR	Min. of PR	To Max. of PR	Std of PR
Non-flat wavefront	0.807	0.528	0.695	0.437	~0.959	0.114	0.411	0.245	~0.530	0.069

比和环围功率比的统计平均值优于非对称结构,在我国大型高功率固体激光装置多路输出实现光束相干合成具有应用潜力。

参 考 文 献

- 1 T. Y. Fan. Laser beam combining for high-power, high-radiance sources[J]. *IEEE J. Selected Topics in Quant. Electron.*, 2005, **11**(3): 567~577
- 2 He Bing, Lou Qihong, Zhou Jun *et al.*. Coherent output power of 60 W from two large-core double-cladding fiber lasers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(8): 1279~1280
何 兵, 楼祺洪, 周 军等. 两根大芯双包层光纤激光器获得 60 W 相干输出[J]. *光学学报*, 2006, **26**(8): 1279~1280
- 3 Zhou Pu, Liu Zejin, Xu Xiaojun *et al.*. Feasibility analysis and effect evaluation of partially coherent combining of high power fiber lasers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(4): 730~733
周 朴, 刘泽金, 许晓军等. 高功率光纤激光部分相干合成的可行性及效果分析[J]. *光学学报*, 2008, **28**(4): 730~733
- 4 Cao Jianqiu, Lu Qisheng, Hou Jing *et al.*. Influence of combining errors in the system for coherent combining of fiber lasers on the far field of output[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(3): 351~358
曹涧秋, 陆启生, 侯 静等. 光纤激光器相干合成系统中组束误差对远场光场的影响[J]. *中国激光*, 2008, **35**(3): 351~358
- 5 Hongcheng Dong, Xiao Li, Chaoyang Wei *et al.*. Coaxial combination of coherent laser beams[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2009, **7**(11): 1012~1014
- 6 N. Miyanaga, H. Azechi, K. A. Tanaka *et al.*. Technological Challenge and Activation of High-Energy PW Laser LFEX[C]. Conf. on Lasers and Electro-Optics/Pacific Rim, 2007; MA2_1
- 7 N. Blanchot, G. Behar, T. Berthier *et al.*. Overview of PETAL, the multi-petawatt project on the LIL facility [J]. *Plasma Phys. Control. Fusion*, 2008, **50**(12): 124045~124054
- 8 J. K. Grunetzner, S. D. Tuchker, D. R. Neal *et al.*. Optical and control modeling for adaptive beam-combing experiments [C]. *SPIE*, **2534**: 94~104
- 9 J. Qiao, A. Kalb, M. J. Guardalben *et al.*. Large-aperture grating tiling by interferometry for petawatt chirped-pulse-amplification systems [J]. *Optics Express*, 2007, **15**(15): 9562~9574
- 10 PI. Industry and research, High performance piezo positioners for OEM[JG]. 2009, <http://www.pi.ws>
- 11 R. A. Zacharias, N. R. Beer, E. S. Bliss *et al.*. National Ignition Facility alignment and wavefront control [C]. *SPIE*, **5341**: 168~179